

Termična analiza 250 kVA trifaznega transformatorja s 3D numerično simulacijo

Zumret Topčagić, Dejan Križaj, Damijan Miljavec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: zumret_topcagic@hotmail.com

Povzetek. V delu je predstavljen model za 3D numerično simulacijo trifaznega transformatorja. Model upošteva elektromagnetne, termične ter hidrodinamične razmere, kar omogoča analizo delovanja zračno ali z izolacijskim oljem hlajenega 250 kVA trifaznega transformatorja. Poudarek je na termični analizi in prikazu porazdelitve temperature v transformatorju. Prikazane so razlike temperaturnih razmer pri uporabi zraka ali izolacijskega olja kot hladilnega medija pri prisilnem hlajenju transformatorja.

Ključne besede: numerične simulacije, transformator, elektrotermična analiza

Thermal analysis of a 250kVA three-phase transformer with a 3D numerical simulation

A 3D numerical simulation model to analyse the electro-thermal properties of a 250 kVA three-phase transformer is presented. The focus is on thermal analysis and evaluation of temperature distribution in the transformer. Different temperature distributions are shown for the cases using air or insulation oil as a cooling medium in the forced cooled transformer.

1 UVOD

Življenjska doba energetskih transformatorjev je v veliki meri odvisna od kakovosti oziroma staranja izolacije. Staranje izolacije in s tem tudi zmanjševanje električne trdnosti je v veliki meri odvisno od temperaturnih razmer obratovanja transformatorja. Mesta s povišano temperaturo (imenujemo jih tudi »vroče točke«) se pojavijo zaradi neustreznega hlajenja delov transformatorja. Dolgoročno pa povzročajo lokalne poškodbe izolacije in skrajšajo življenjsko dobo transformatorja. Susa in Nordman [1] opisujeta analitičen postopek izračuna temperatur vročih točk ter njihovo upoštevanje pri dimenzioniranju transformatorjev. Nekateri avtorji opisujejo različne načine in analize hlajenja transformatorjev [2], drugi pa se osredinijo na analize virov toplote v transformatorju, kot so npr., vrtnični tokovi [3]. Spet drugi se poglobijo v elektrotermične sklopitve, kjer izgube povežejo s spremembo temperature in to nazaj na upornosti navitij [4]. Omenjeni članki omogočajo dober vpogled v temperaturno sliko transformatorja, ne omogočajo pa lokalizacije mest vročih točk. To pa je ključno za uspešno načrtovanje hlajenja transformatorja. To vrsto analize omogoča numerična metoda, kot je prikazano v [5]. V tem delu avtorji predstavijo numeričen model in analizo energetskega transformatorja suhega tipa.

Današnja orodja za numerično simulacijo in analizo so praviloma zmožna obravnave zelo kompleksnih geometrij, kar pa pogosto zelo podaljša čas izračuna ali celo oteži konvergenco sistema enačb k rešitvi. Poleg tega je treba za sklopljeno analizo elektrotermičnih pojavov sočasno upoštevati več fizikalnih pojavov, kar še dodatno poveča zahtevnost izračuna. Zato se pogosto poenostavijo geometrijske oblike modelov, na primer; Smolka in Nowak sta v [5] predpostavila simetrijo transformatorja ter obravnavala le 1/4 geometrije. Prav tako pa se poenostavi tudi fizikalna kompleksnost modela, na primer; zanemaritev kožnega pojava, število ovojev navitja in podobno [5]. V predstavljenem delu opisujemo izdelavo 3D simulacijskega modela za statično in dinamično elektromagnetno ter model za termično analizo delovanja 250 kVA trifaznega transformatorja. Model upošteva tako električne lastnosti za izračun porazdelitve magnetnega polja ter Joulovih izgub, kot tudi termične lastnosti za izračun porazdelitve temperaturnega polja. Nadaljnja sklopitev modela s hidrodinamičnimi lastnostmi omogoča izračun poteka pretoka hladilne tekočine. V delu obravnavamo tudi problem ustrezne določitve termičnih mejnih pogojev, kar se lahko do določene mere reši z upoštevanjem eksperimentalno izmerjenih vrednosti v statičnih razmerah. Model omogoča analizo vpliva spremembe električnih in geometrijskih parametrov ter spremembe materialov na delovanje transformatorja. Poudarek je na termični analizi, torej na analizi porazdelitve temperature po celotnem transformatorju ter prenosu toplote z navitji in jedra (virov toplote) na hladilni medij, kot tudi na ohišje transformatorja. Končni cilj je izdelava naprednega numeričnega modela za določanje vročih točk v transformatorju in s tem optimizacijo tako transformatorja kot tudi hladilnega sistema.

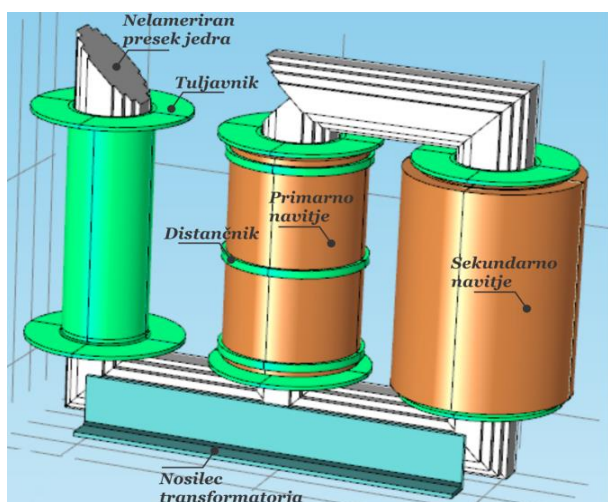
2 GEOMETRIJSKI MODEL

Za 3D model in izračun smo uporabili nazivne podatke transformatorja, ki so podani v dokumentaciji izdelovalca [6].

$S = 250$ [kVA]		$f = 50$ [Hz]		Stik: Yy0	
$U_1 = 10000,0$ [V]		$I_1 = 15,6$ [A]		$S_{Fe} = 907,3$ [cm ²]	
$U_2 = 400,0$ [V]		$I_2 = 389,7$ [A]		$k_{Fe} = 1$ [W/kg]	
Navitje	Število ovojev	S_{Cu} [mm ²]	J [A/mm ²]	Faktor navitja v modelu	S_{Cu} model [mm ²]
Primar	700	9,89	1,58	0,22	32000
Sekundar	32	178,75	2,2	0,26	22000
Višina okna: 650 [mm]			Širina okna: 312 [mm]		

Tabela 1: Osnovni geometrijski in električni podatki transformatorja

Faktor polnjenja primarnega in sekundarnega navitja je relativno majhen, v dejanski izvedbi simuliranega transformatorja so namreč uporabljeni distančniki med vsakim slojem navitij. Upoštevanje teh distančnikov v simulacijskem modelu bi močno povečalo število elementov mreže končnih elementov in s tem zahtevnost generiranja mreže in posledično zahtevnost numeričnega izračuna. V modelu pa je upoštevan distančnik med primarnim in sekundarnim navitjem, kot to prikazuje slika 1. Transformator je v osnovi v suhi izvedbi, v modelu pa je simulirano tudi delovanje transformatorja z uporabo izolacijskega olja kot hladilnega medija.

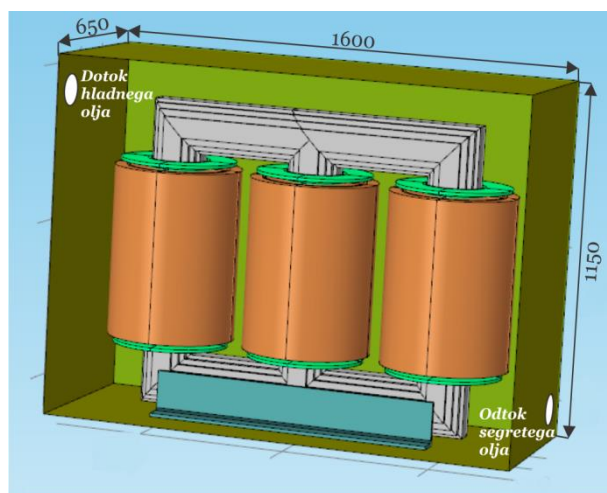


Slika 1: Geometrija in prikaz sestavnih delov transformatorja.

Geometrijo trifaznega transformatorja smo povzeli po dokumentaciji [6] in iz meritev na elementih transformatorja, ki ga izdeluje podjetje ELMA TT,

Ljubljana. V geometrijskem modelu so bile narejene naslednje poenostavitve:

- jedro je iz masivnega železa (nelamelirano),
- ovoji v navitjih so predstavljeni kot en sam ovoj, ki ima (z upoštevanjem faktorja polnjenja) presek enak skupnemu preseku ovojev navitja,
- transformator je postavljen v jekleno nerebrasto ohišje.



Slika 2: Prikaz delov transformatorja in načina hlajenja z izolacijskim oljem

2.1 Materiali

Električne in termične lastnosti materialov smo povzeli po literaturi in privzetih vrednostih iz programa Comsol Multiphysics [7,8]. V konkretnem modelu smo predpostavili, da so lastnosti materialov konstantne (neodvisne od temperature in magnetnega polja). Na podlagi dokumentacije smo razbrali uporabljene materiale ter poiskali njihove električne in termične lastnosti. Uporaba konstantnih vrednosti snovnih lastnosti omogoča nekoliko preprostejšo analizo delovanja transformatorja. V tem delu so simulirane le stacionarne obratovalne razmere transformatorja, zato je upoštevanje konstantnih vrednosti upravičeno. 3D model, ki upošteva nelinearnosti materialov in združuje več fizikalnih pojavov (na primer elektromagnetiko, termodinamiko in mehaniko), se pogosto izkaže za težko rešljivega.

3 FIZIKALNI MODEL

V tem poglavju bomo na kratko opisali lastnosti fizikalnih podmodelov, ki smo jih uporabili pri fizikalno sklopljenih simulacijah. Zavedati se moramo, da je pri uporabi numerične simulacije vedno v ozadju reševanje diferencialnih enačb, ki izhajajo iz temeljnih zakonov fizike. Pri tem so nujne določene poenostavitve, ki pa lahko rezultirajo v razliki med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi. Poleg poenostavitve v fizikalnem opisu lahko razlike v izračunih nastanejo

tudi zaradi neustrezno izbranih vrednosti snovnih lastnosti materialov [5] ali pa zaradi preveč poenostavljene geometrije. Zavedati se je treba, da popolnega ujemanja izmerjenih in izračunanih vrednosti ni mogoče pričakovati in da je največji pomen simulacij vizualizacija sicer težko predstavljenih fizikalnih količin in analiza vplivov različnih parametrov (geometrijskih, snovnih) na delovanje transformatorja.

3.1 Elektromagnetni podmodel

Elektromagnetne lastnosti transformatorja opisuje Amperov zakon. V simulacijskem okolju numeričnega programa [8] je zapisan z vektorskim magnetnim potencialom \mathbf{A} :

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M}) - \sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma \nabla V = \mathbf{J}_e. \quad (1)$$

σ je specifična prevodnost, \mathbf{M} je vektor magnetizacije, \mathbf{v} je vektor hitrosti gibanja strukture, V je električni potencial, μ_0 je permeabilnost zraka in \mathbf{J}_e gostota vzbujalnega toka, ki povzroča magnetno polje. V stacionarnih razmerah, ki jih obravnavamo v nadaljevanju, lahko enačbo (1) poenostavimo v obliko (2)

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e. \quad (2)$$

Pri tem smo upoštevali še konstantno permeabilnost jedra. Velja torej $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$, $\mathbf{M} = (\mu_r - 1) \mathbf{H}$ in $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$.

Izgubna moč in gostota moči v ovojih se določi iz toka v navitju I_e in iz znane specifične prevodnosti bakra s pomočjo enačb (3) in (4):

$$I_e = \int \mathbf{J}_e d\mathbf{S} \quad (3)$$

$$P_{navitja} = I_e^2 R_{navitja}. \quad (4)$$

Ta moč oziroma gostota te moči ($p_{navitja} = P_{navitja}/V_{navitja}$) je vhodni podatek za termični model, ki ga opisujemo v nadaljevanju.

3.2 Termični podmodel

Ključni del simulacije je uporaba ustreznega numeričnega podmodela za termično analizo. Osnovna enačba izhaja iz zakona o ohranitvi energije, znanega tudi kot prvi zakon termodinamike.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau} : \mathbf{S} - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \Big|_p \left(\frac{\partial p}{\partial T} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) p \right) + Q \quad (5)$$

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T), \quad (6)$$

kjer so:

- ρ – gostota snovi [kg/m³]
- c_p – specifična toplota [J/kgK]
- T – temperatura [K]
- \mathbf{u} – vektor hitrosti gibanja hladilnega medija [m/s]
- \mathbf{q} – toplotni pretok [W/m²]
- p – tlak [Pa]
- $\boldsymbol{\tau}$ – tensor viskoznosti [Pa]
- \mathbf{S} – tenzor deformacije (ang. strain-rate tensor)
- Q – gostota toplotne moči [W/m³]

Po navadi se enačbi (5) in (6) rešujeta v poenostavljeni obliki s tem, da zanemarimo vpliv spremembe tlaka (adiabatski tlak in termoakustični efekt) in spremembo temperature zaradi trenja. Če zanemarimo še vplive zaradi spremembe hitrosti, se enačba (5) preoblikuje v:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q. \quad (7)$$

Q je gostota moči, ki je vir toplote in je v našem primeru določen v elektromagnetnem modelu kot segrevanje žice zaradi toka v njej (en. 4). Ker pri analizi upoštevamo le stacionarne razmere in hkrati upošteva hitrost gibanja hladilnega medija (\mathbf{u}), je končna oblika enačbe za izračun porazdelitve temperature v analizirani strukturi:

$$\rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q. \quad (8)$$

3.3 Hidrodinamični podmodel

Termična analiza v vseh obratovalnih stanjih je izvedena s prisilnim hlajenjem (pretok izolacijskega olja oziroma zraka) in z upoštevanjem naravne konvekcije (odvajanje toplote z ohišja transformatorja). Odvod toplote s sevanjem upoštevamo le pri odvajanju toplote z ohišja v okolico. Pri prisilnem hlajenju je izolacijsko olje s konstantnim pretokom črpano skozi odprtine v ohišju. Vhodna in izhodna odprtina za pretok izolacijskega olja je prikazana na sliki 2. Za izračun pretoka olja rešujemo enačbo Navier-Stokes, katere rešitev je hitrost pretoka tekočine:

$$\rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] + \mathbf{F} \quad (9)$$

in

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (10)$$

kjer so:

- ρ – specifična gostota [kg/m³]
- T – temperatura [K]
- \mathbf{u} – vektor hitrosti pretoka tekočine [m/s]
- p – tlak [Pa]
- \mathbf{F} – gostota sile (ang. body force) [N/m³]
- \mathbf{I} – identiteta (enotska matrika)

4 MEJNI POGOJI

Poleg virov, ki jih moramo vnesti v model za numerični izračun, je treba pri vsakem modelu ustrezno upoštevati tudi mejne pogoje. Mejne pogoje med elementi znotraj strukture upošteva sam program pri diskretizaciji enačb, medtem ko je treba mejne pogoje na zunanjih mejah strukture ustrezno določiti.

4.1 Elektromagnetni mejni pogoji

Osnovni lastnosti magnetnega polja je neizvornost in širitev v neskončnost. Pri simulacijah magnetnega polja se omejimo na neko velikost okolice oziroma mejo, kjer poznamo oziroma določimo vrednost magnetnega polja. V obravnavanem modelu smo postavili robni pogoj na ohišje transformatorja in mu priredili enačbo, ki postavi tangencialno komponento magnetnega vektorskega potenciala na površini enako 0, kar hkrati pomeni, da bo komponenta gostote magnetnega pretoka, ki je pravokotna na normalo površine, enaka 0 [8].

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0 \quad (11)$$

Ta mejni pogoj je sicer ustrezno izpolnjen na neki dovolj veliki oddaljenosti od strukture, vendar se število diskretnih točk s povečevanjem simulirane okolice lahko tako poveča, da izrazito zmanjša hitrost izračunavanja. Pri modelih, kjer je glavnina magnetnega polja zaobjeta v feromagnetnem materialu, kot je tudi pri analiziranem transformatorju, je mejni pogoj (11) ustrezen, saj se magnetno polje večinoma zaključuje znotraj feromagnetnega materiala. Če bi analizirali transformator v pogojih, ko bi tokovi v navitjih tekli v isto smer (sofazni toki), bi magnetno polje izstopalo iz jedra in se zaključevalo po ohišju transformatorja, ki je prav tako feromagnetno. V tem primeru lahko pričakujemo le majhno zaključevanje polja po zunanji okolici (zraku) in tudi tu velja mejni pogoj (11).

4.2 Termični mejni pogoji

Najpreprostejši mejni pogoj za temperaturo na zunanji meji je podan kot konstantna temperatura. Drug mogoči mejni pogoj je podan z vrednostjo normalne komponente temperaturnega pretoka (fluksa) \mathbf{q} na zunanji meji

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_0, \quad (12)$$

kjer je

$$q_0 = h \cdot (T_{\text{inf}} - T). \quad (13)$$

Enačbi (12) in (13) opisujeta mejne pogoje pri termični analizi, kjer so:

- \mathbf{q} – vektor konduktivnega toplotnega pretoka [W/m²]
- \mathbf{n} – vektor normale na mejo
- q_0 – toplotni pretok, pravokoten na mejo [W/m²]

Če je q_0 enak nič, govorimo o termično izolirani meji. Ko je q_0 konstanten, gre za primer konstantnega odvajanja toplote, ki ga po navadi opišemo s parametrom toplotne prestopnosti h (ang. heat transfer coefficient) in z razliko temperature daljne okolice in temperature na meji (13). Ta enačba se najpogosteje uporablja kot model za konvektivno odvajanje toplote. Pri tem je ustrezna izbira parametra h izjemno zahtevna [7], a hkrati tudi ključna za končni rezultat. Najpogosteje se določi kar empirično iz primerjave meritev in simulacij.

V našem simulacijskem modelu pomeni ohišje transformatorja robno geometrijo modela, na katerem je treba nastaviti mejne pogoje. Predpostavljamo, da je transformator prigraven na neko telo (nosilec), ki odvaja toploto hitreje kot okolica. Za ohišje je določeno odvajanje toplote s koeficientom $h = 80 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ in $h = 180 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ na meje nosilca transformatorja. Poleg tega toploto odvajamo še s prisilnim hlajenjem. Hladilna tekočina vstopa v ohišje transformatorja s podano temperaturo T_0 in izstopa s temperaturo, izračunano v simulaciji. Mejne pogoje pretakanja tekočine pomenita dva zunanja dela geometrije modela, in sicer kot vstopna in izstopna točka tekočine s podanim pretokom [kg/s].

4.3 Hidrodinamski mejni pogoji

Mejni pogoji, potrebni za izračun pretoka hladilnega olja, zahtevajo naslednje: določitev interakcije olja oziroma hitrosti pretoka olja ob stenah, masni pretok m ([kg/s]) dotekanja olja skozi vhodno odprtino ter pritisk na vходу ali izhodu. Za vstopno površino hladilnega olja (slika 2) velja mejni pogoj (14)

$$\int \rho(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})dS = m. \quad (14)$$

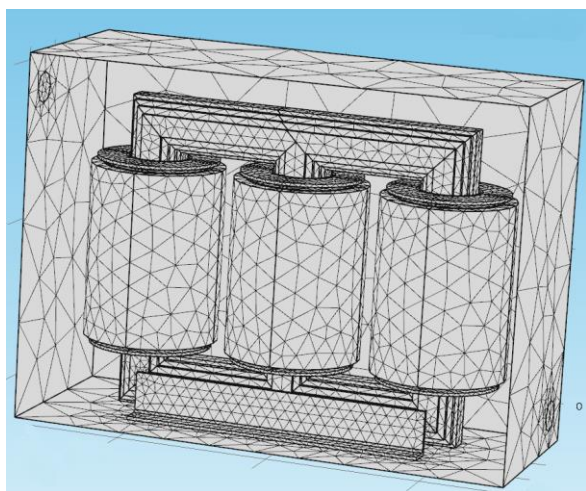
Za stik olja in sten transformatorja in ohišja smo uporabili meni pogoj, kjer smo postavili hitrost olja ob stenah enako nič (15):

$$\mathbf{u}_{\text{ob stenah}} = \mathbf{0}. \quad (15)$$

Za pritisk na izstopni površini olja in v samem kotlu smo prevzeli vrednost 1 atmosfera.

5 POSTAVITEV MREŽ KONČNIH ELEMENTOV

Program diskretizira prostor tako, da ga razdeli na področja tetraedrične, heksaedrične oblike, prizme ali piramide. Ploskve se razdelijo na trikotnike, robovi pa se diskretizirajo na posamezne elemente. Mreža se generira avtomatično, pri čemer lahko nastavimo največjo in najmanjšo velikost elementov ter prostorski gradient spreminjanja gostote mreže. Število elementov mreže vpliva na natančnost izračuna, pri čemer veliko število elementov podaljša čas izračuna.



Slika 3: Generacija mreže v modelu

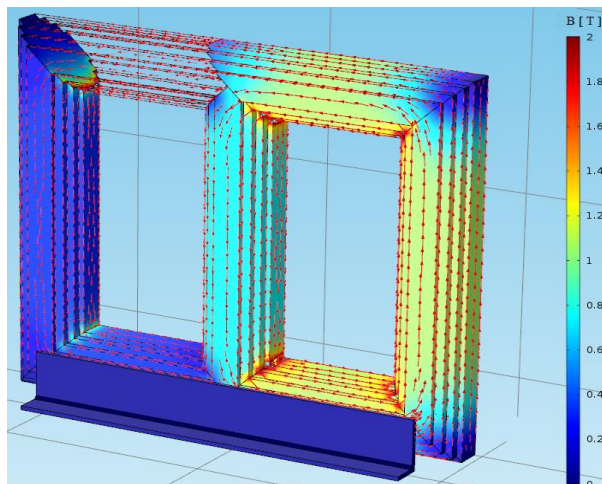
Prikazana mreža končnih elementov (slika 3) je opisana z naslednjimi parametri:

- število tetraedričnih elementov 100759
- število trikotnih elementov 30846
- število robnih elementov 7741
- razmerje element/volumen $2 \cdot 10^{-5}$

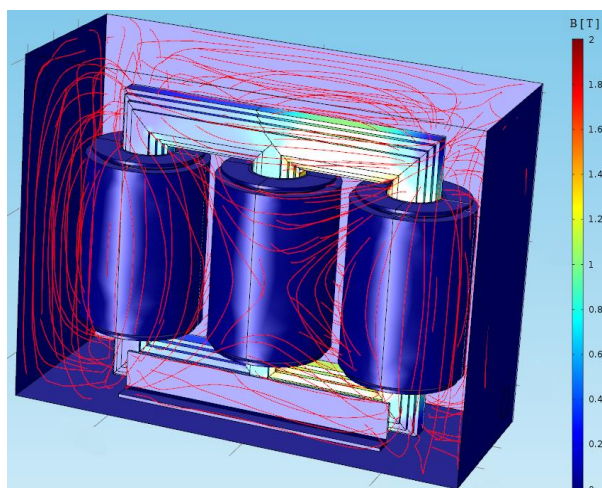
6 REZULTATI

6.1 Prosti tek

V tem poglavju bomo prikazali magnetne razmere transformatorja v prostem teku. Ker elektromagnetna analiza transformatorja ni glavni cilj predstavljene analize, smo predpostavili linearnost transformatorskega jedra z $\mu_r = 22000$. Tokovi v tuljavah glede na sliko 2 so bili od leve proti desni: 0.075 A, 0.075 A in - 0.15 A. Na sliki 4 je prikazana gostota magnetnega pretoka v jedru (smer, velikost). Opazimo mesta (na notranji vogalih oken), kjer gostota magnetnega pretoka doseže vrednost 1,6-2 T. Na teh mestih bi v realnih razmerah (nelinearen material) pričakovali nasičenje jedra. Slika 5 pa prikazuje stresani magnetni pretok v okolici tuljav v notranjosti kotla.



Slika 4: Prikaz gostote magnetnega pretoka v jedru pri odprtih sponkah sekundarja



Slika 5: Prikaz stresane gostote magnetnega pretoka v okolici jedra transformatorja

6.2 Prosti tek transformatorja

Transformator je priključen na napajalno napetost, pri tem pa so sekundarne sponke razklenjene. V simulaciji je to stanje opisano tako, da je v primarno navitje transformatorja vsiljen tok z amplitudo magnetilnega toka transformatorja, v sekundarnem navitju pa ni toka. Efektivna vrednost primarnega in sekundarnega toka je:

$$I_1 = 1,5\% I_{1n} = 0,234 \text{ A}$$

in

$$I_2 = 0. \text{ A.}$$

Velja še:

$$P_{Cu} = 3I_1^2 R_{navitja.P} \text{ in}$$

$$R_{navitja.P} = \rho \frac{l}{S_{Cu}} = 0,9975 \Omega, \text{ od koder sledi}$$

$$P_{Cu} = 0,164 \text{ W.}$$

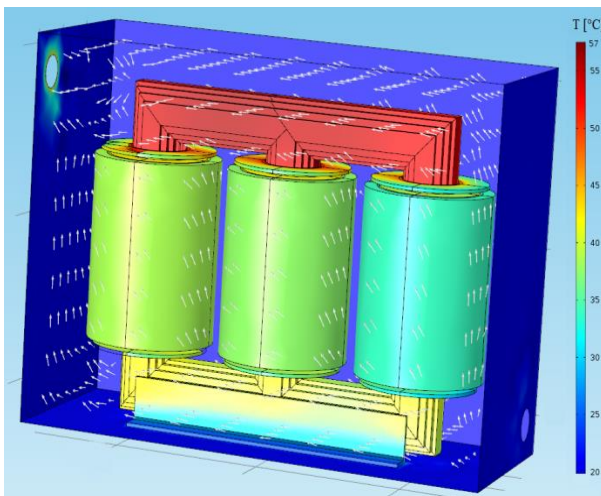
Izgube v železu, opisane v [9], določimo z enačbo:

$$P_{Fe} = k_{Fe} \frac{f}{50} \left(\frac{B}{1,5} \right)^2 m_{Fe}, \quad (16)$$

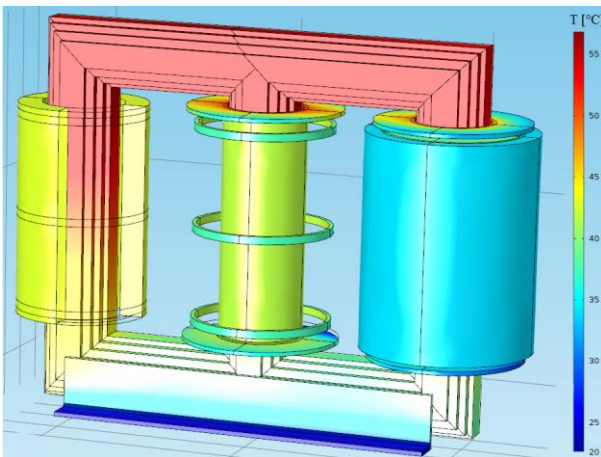
kjer je k_{Fe} konstanta feromagnetnega materiala, m_{Fe} masa jedra, f frekvenca in B maksimalna gostota magnetnega pretoka.

Izgube v železu, izračunane po enačbi (16), so za obravnavani transformator 746,4 W.

Izgube navitja so izračunane v simulaciji. Pri izračunu upornosti določi programski paket Comsol Multiphysics srednjo vrednost radija navitja, iz katere se nato izračuna upornost navitja in izgube.



Slika 6: Porazdelitev temperature v prostem teku. Puščice označujejo smer kroženja olja. (brez prisilnega hlajenja)



Slika 7: Porazdelitev temperature v prostem teku

6.3 Nazivna obremenitev

Transformator je priključen na napajalno napetost in obremenjen z nazivno močjo. V simulaciji je to stanje opisano tako, da je v primarno in sekundarno navitje transformatorja vsiljen nazivni tok transformatorja:

$$I_1 = I_{1n} = 15,6 \text{ A}$$

$$I_2 = I_{2n} = 389,7 \text{ A.}$$

Izgubni moči primarnega in sekundarnega navitja določimo iz:

$$P_{Cu} = I_1^2 R_{navitja.P} \text{ in } P_{Cu} = I_2^2 R_{navitja.S},$$

kjer sta

$$R_{navitja.P} = \rho \frac{l}{S_{Cu}} = 0,9975 \Omega \text{ in}$$

$$R_{navitja.S} = \rho \frac{l}{S_{Cu}} = 0,00367 \Omega.$$

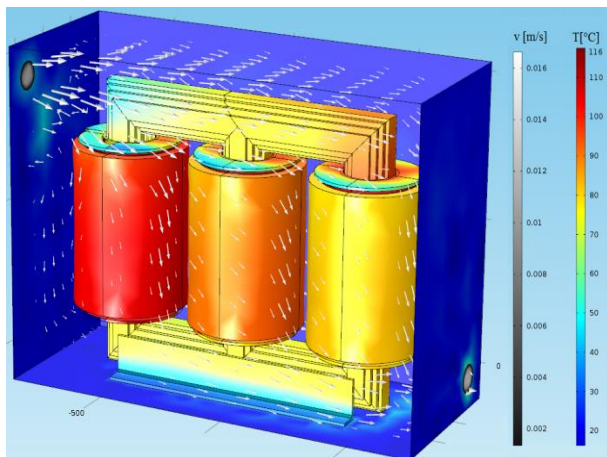
Tako dobimo:

$$P_{Cu,P} = 728,44 \text{ W in } P_{Cu,S} = 1664,41 \text{ W.}$$

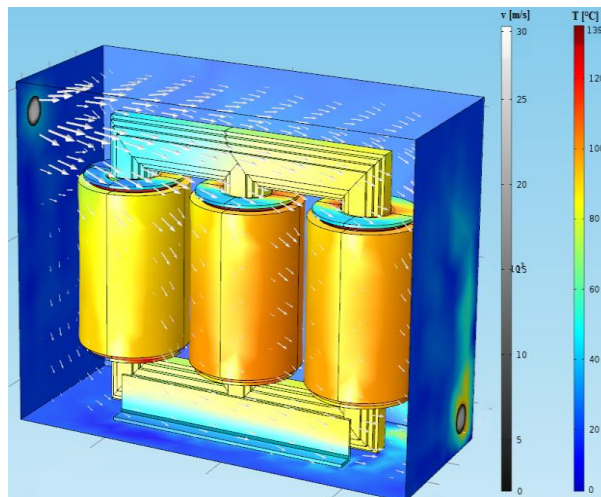
Izgube železa ostanejo enake kot pri obratovanju transformatorja v prostem teku, to je 746,4 W.

Masni pretok olja, ki ga črpamo skozi ohišje transformatorja, pri nazivni obremenitvi znaša $m_{olja} = 0,055 \text{ kg/s}$.

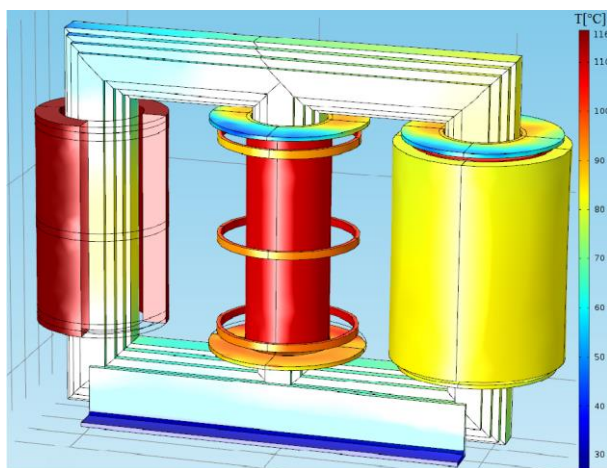
Iz rezultatov simulacije (Slika 9) ugotovimo, da je pri nazivni obremenitvi dosežena temperatura transformatorja v temperaturnih mejah razreda izolacije F. Opazimo tudi, da je masni pretok prisilnega hlajenja zelo majhen in da doseže hitrost pretoka olja skozi vstopno odprtino 0,016 m/s (slika 8). Pri nazivni obremenitvi smo naredili izračun tudi za primer hlajenja transformatorja z zrakom (Slika 10). Ohranili smo enak masni pretok kot pri hladilnem olju. Ugotovimo lahko, da je temperatura navitij višja kot pri hladilnem olju. Transformatorsko olje ima namreč višjo toplotno prevodnost. Opazimo tudi veliko večjo hitrost pretakanja zraka, saj je njegova gostota veliko manjša od gostote olja. Za ohranitev enakega pretoka moramo povečati hitrost pretakanja. Iz slik 8 in 10 je lepo razvidno, da je pri hlajenju z oljem temperatura levega navitja višja od temperature srednjega in desnega navitja. Pri hlajenju z zrakom pa so temperature vseh navitij približno enake (absolutne vrednosti temperature pa so pri hlajenju z oljem nižje). To je posledica različnega kroženja hladilnega medija okoli navitij. Zrak ima veliko manjšo gostoto ter lažje kroži v kotlu transformatorja in s tem bolj homogeno hladi navitja. Nehomogena porazdelitev temperature jedra transformatorja (slika 7) v prostem teku je posledica različnega odvajanja toplote prek nosilcev transformatorja. Ta toploto odvaja hitreje kot okolica.



Slika 8: Prikaz porazdelitve temperature in hitrosti pretoka (vstopna in izstopna odprtina), puščice označujejo smer pretakanja olja



Slika 10: Porazdelitev temperature pri nazivni obremenitvi in hlajenju z zrakom. Puščice označujejo smer pretakanja zraka.



Slika 9: Prikaz porazdelitve temperature pri nazivni obremenitvi

Ko transformator obratuje pri nazivni moči in je hlajen z oljem (sliki 8 in 9), opazimo zelo povišano temperaturo levega navitja. Pričakujemo lahko, da bo tudi tam nastala vroča točka. Temperaturo vroče točke pa je mogoče znižati z ustreznim načrtovanjem hladilnega sistema, na primer tako, da spremenimo način hlajenja s spremembo lege vstopne odprtine hladilnega medija. Poleg tega opazimo tudi povišano temperaturo v zgornjih vogalih oken transformatorja (slika 8), kar je seveda povezano s slabim odvajanjem toplote na teh mestih. To je posledica smeri pretakanja olja, ki je vzporedna z oknom in jedrom transformatorja in je na teh območjih minimalno. Pretakanje olja, ki bi bilo pravokotno na okna transformatorja, bi precej zmanjšalo visoke temperature v vogalih transformatorja. Ker je gostota magnetnega pretoka največja ravno na vogalih, so tudi izgube v jedru največje na teh mestih. Pri hlajenju z zrakom dosežemo precej boljšo homogenost hlajenja (slika 10), pri čemer pa je treba zagotoviti veliko večjo hitrost pretakanja zraka.

7 SKLEP

Namen prispevka je prikazati možnosti analize termičnih pojavov v transformatorju s pomočjo numerične simulacije. Izkazuje se, da je najzahtevnejša in časovno potratna izdelava konsistentnega modela, ki bo ustrezno upošteval vse pomembnejše fizikalne pojave ter kljub kompleksnosti in velikemu številu elementov diskretne mreže končnih elementov še vedno omogočal numerično konvergenco. Izdelani 3D model transformatorja upošteva elektromagnetne lastnosti, ki so sklopljene s termičnimi pojavi, ta pa s hidrodinamičnimi za izračun pretakanja hladilnega olja. Pri termični analizi smo iz električnega dela izračunano moč uporabili kot vir toplote in določili porazdelitev temperature po transformatorju. Največji problem termične analize je ustrezna določitev mejnega (robne) pogoja. Tega ne moremo določiti ob predpostavki, da je v daljni okolici temperatura enaka temperaturi okolice, pač pa je treba upoštevati, da segreti deli oddajajo v okolico toploto tudi s konvekcijo in ne le s termičnim sevanjem. Sama konvergenca numeričnega postopka reševanja ob ustrezno nastavljenih vrednostih pa ni bila problematična. Opisani 3D model transformatorja je dobro izhodišče za nadaljnjo študijo temperaturnih in elektromagnetnih razmer pri različnih načinih obratovanja. Analize postanejo numerično zahtevnejše, ko želimo analizirati in upoštevati še magnetno nelinearnost jedra, spremembo tlaka zaradi temperature in podobno.

LITERATURA

- [1] D. Susa, H. Nordman, A Simple Model for Calculating Transformer Hot-Spot Temperature, IEEE Transactions on power delivery, vol. 24, no. 3, July 2009.
- [2] J. M. Mufuta, E. van den Bulck, Modelling of the mixed convection in the windings of a disc-type transformer, Appl. Thermal Engrg. 20 (2000) 417–437.

- [3] K. Preis, O. Biro, I. Tigar, FEM analysis of eddy current losses in nonlinear laminated cores, *IEEE Trans. Magnetics* 41 (2005) 1412–1415.
- [4] O. Biro, K. Preis, G. Buchgraber, Strong thermal-electromagnetic coupling in FEM simulation of power transformers, *Proceedings of Int. Conf. on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems 2005*, Santorini, Greece, 2005.
- [5] J. Smolka, A. J. Nowak, Experimental validation of the coupled fluid flow, heat transfer and electromagnetic numerical model of the medium-power dry-type electrical transformer, *International Journal of Thermal Sciences* 47 (2008) 1393–1410.
- [6] Tehnična dokumentacija, ELMA TT.
- [7] Incropera, DeWitt, Bergman, Lavine: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed., John Wiley & Sons; 6th edition (March 10, 2006).
- [8] <http://www.comsol.com>.
- [9] Damijan Miljavec, Peter Jereb, *Električni stroji - temeljna znanja*, Ljubljana 2008.
- [10] Elektrotehniški vestnik na spletu, <http://ev.fe.uni-lj.si> (1.1.2011).

Zumret Topčagić je diplomiral leta 2012 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo numerične simulacije v elektromagnetiki in uporabo komercialnih orodij v raziskovalne namene.

Dejan Križaj je izredni profesor na Fakulteti za Elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Predava predmeta Osnove elektrotehnike I in Osnove elektrotehnike II ter predmet Manipulacija in detekcija mikro- in nanodelcev z električnim in magnetnim poljem na doktorskem študiju bioznanosti. Njegovo raziskovalno delo je povezano z numerično simulacijo elektromagnetnih pojavov v povezavi z drugimi fizikalnimi pojavi ter področje uporabe (mikro)senzorjev v biotehnologiji in medicini. Je predstojnik Laboratorija za bioelektromagnetiko.

Damijan Miljavec je izredni profesor na Fakulteti za Elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Raziskovalno se ukvarja z analizo in oblikovanjem električnih strojev.